

МОДЕЛЮВАННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ ҐРУНТОВИХ ВОД НА ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ГЛИБОКИХ КОТЛОВАНІВ

Інститут екології та дизайну НАУ, e-mail: raa-nau@ukr.net

Проаналізовано вплив глибоких котлованів на динаміку ґрунтових вод у межах забудови. Наведено основні рівняння для моделювання процесів, що відбуваються в ґрунтах основи.

Вступ

Глибокі виїмки поблизу старих будинків, архітектурних пам'яток, високих сусідніх будівель значно впливають на напружено-деформований стан ґрунтів основи та динаміку ґрунтових потоків на прилеглий території.

Виїмки таких котлованів мають глибину до 12–15 м і більше, що потребує розробки надійної конструкції кріплень, які огорожують їх стінки, а також вивчення динаміки ґрунтових вод, встановлення можливих проявів суфозії, що впливає на стан споруд на прилеглий до котловану території. Щоб запобігти підтоплення та розвитку суфозії в умовах щільної міської забудови, потрібно мати точний прогноз динаміки рівня підземних вод та правильно вибрати методи осушення котлованів.

Положення рівня ґрунтових вод і можливість його зміни в період будівництва й експлуатації будинків і споруд впливають на вибір типу фундаментів та їхніх розмірів, глибини закладення, водозахисних заходів та ін.

При підвищенні рівня ґрунтових вод можуть змінюватися деформаційні властивості і міцність глинистих ґрунтів основи, виникати осідання чи набрякання ґрунту, збільшуватися ступінь морозної пучності та ін. При зниженні рівня ґрунтових вод можуть виникати додаткові ущільнення як глинистих, так і піщаних ґрунтів.

Розрахункове положення рівня ґрунтових вод і можливість зміни вологості ґрунтів у процесі будівництва споруд приймають за результатами інженерно-геологічних вишукувань і прогнозів, виконаних на основі спеціальних розрахунків.

У разі закріплення стінок котловану шпунтовою стінкою чи пальовими кріпленнями вода в котлован надходить через дно чи водопроникні зони в стінках.

Якщо стінка облаштована, то глибина її занурення в ґрунт повинна мінімізувати вихідні швидкості фільтрації для запобігання суфозійних процесів, які призводять до деформацій ґрунту в основах споруд, що розташовані поблизу котловану.

Слід зазначити, що на фільтраційні потоки ґрунтових вод на забудованих територіях додатково впливає інфільтраційне живлення за рахунок втрат води з комунікацій і каналізаційних систем, а також баражного ефекту в зонах пальових полів і шпунтових стінок котлованів.

Особливістю фільтраційних плинів під час осушення глибоких котлованів і досить високому побутовому рівні ґрунтових вод є формування зон з високими градієнтами напору і швидкостями фільтрації, що викликають посилену механічну суфозію різномірних ґрунтів. Це підтверджує необхідність спільного вивчення процесів фільтрації і суфозії для прогнозування можливих аварій і обґрунтування параметрів надійних інженерних споруджень.

Аналіз досліджень і публікацій

Аналіз особливостей фільтрації води в умовах інтенсивного техногенного впливу показує, що процеси суфозії і кольматажу значно впливають на формування структури пористого простору, фільтраційні і механічні властивості ґрунтів.

Тривалий розвиток процесів механічної суфозії, що супроводжується зважуванням, переміщенням і виносом дрібнодисперсних часток з кістяка ґрунту, може привести до значного збільшення водопроникності ґрунту, а також до втрати його міцності та стійкості.

Такі явища приводять до опущення і навіть провалів поверхні землі, які слугують причиною аварій і навіть повних руйнувань житлових будинків і різних інженерних споруджень з важкими екологічними наслідками [1; 2].

Останніми роками математичні моделі і методи розрахунку фільтрації з урахуванням зміни властивостей ґрунтів і штучних пористих матеріалів під час суфозії і кольматажу при екологічному прогнозуванні одержали значний розвиток у працях [3–7].

Разом з тим, методи моделювання фільтрації на забудованих територіях житлових масивів міст у зонах впливу глибоких котлованів з урахуванням зміни властивостей ґрунтів при суфозії і кольматажі розроблені ще недостатньо.

Постановка завдання

Прогнозування зміни рівня ґрунтових вод у зв'язку з вибором безпечного для будинків і споруд його положення виконується на основі аналізу матеріалів вишукувань, встановлення тих факторів або їх комплексів, які викликають підвищення рівня чи його зниження. При цьому виділяють види режиму за характером дії факторів по площі: рівномірне, нерівномірне, суцільне чи лінійне, локальне і т.д. Під час прогнозування рівня ґрунтових вод враховують, що його підвищення може мати місце як на площадках, де проводиться забудова, так і після закінчення будівництва.

Для встановлення впливу глибоких котлованів на динаміку ґрунтових вод і можливості розвитку процесів суфозії розглянемо такі математичні моделі.

Основою для побудови математичних моделей фільтрації ґрунтових вод на забудованих територіях в межах впливу глибоких котлованів з урахуванням різних факторів і процесів механічної суфозії і кольматажу є рівняння руху і нерозривності рідини, конвективної дифузії, зважених частинок і масообміну, а також експериментальні співвідношення, що виражають закон опору (у разі лінійної фільтрації – це закон Дарсі) і залежність коефіцієнта фільтрації від концентрації осаду.

У разі лінійної фільтрації однокомпонентної рідини ці рівняння можна записати в загальному вигляді:

$$\mu_c \frac{\partial H}{\partial t} = \operatorname{div}(k(\sigma) \operatorname{grad} H); \quad (1)$$

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} C - \bar{V}C) - \frac{\partial \sigma}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\bar{V} = -k(\sigma) \operatorname{grad} H;$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = f(C, \sigma, C_{\max}, \sigma_{\max}, \eta_1 \dots \eta_N), \quad (3)$$

де μ_c – коефіцієнт пружної ємності шару; H – гідродинамічний напір:

$$(H = H(x, y, z, t);$$

t – час; $k(\sigma)$ – коефіцієнт фільтрації, що залежить від концентрації осаду; σ – масова концентрація осаду:

$$\sigma = \sigma(x, y, z, t);$$

n – пористість ґрунту; C – масова концентрація зважених дрібнодисперсних забруднень:

$$C = C(x, y, z, t);$$

D – коефіцієнт конвективної дифузії; \bar{V} – вектор швидкості фільтрації; C_{\max}, σ_{\max} – максимальні концентрації забруднень у пористому розчині і

твердій фазі; η_1, \dots, η_N – експериментальні коефіцієнти.

Рівняння кінетики (3) описує різні випадки масообміну зважених забруднень з матеріалом пористого середовища, причому аналіз літературних джерел [8–10] показав, що для опису фізичної (механічної) суфозії і кольматації ґрунту найчастіше використовуються наведені нижче рівняння.

Рівняння кінетики необерненої фізичної сорбції:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \alpha C, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт швидкості прилипання частинок.

Рівняння застосовують для опису початкового періоду масообміну в пористому середовищі при низькій концентрації зважених забруднень, малій швидкості фільтрації і високій сорбційній ємності пористого середовища.

Лінійне рівняння нерівновагової оборотної фізичної адсорбції і десорбції (кольматації і суфозії):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \alpha C - \beta \sigma, \quad (5)$$

де β – коефіцієнт швидкості відриву.

Рівняння (4), (5) використовуються в дослідженнях під час розв'язання рівнянь масопереносу і масообміну аналітичними методами.

Нелінійне рівняння нерівно вагової оборотної фізичної адсорбції і десорбції (кольматації і суфозії):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \alpha^* (\sigma_{\max} - \sigma) C - \beta \sigma. \quad (6)$$

Рівняння (6) більш точно апроксимує результати експериментальних досліджень, однак, використовуючи його, необхідно застосовувати наближені методи розв'язання. Лінеаризація рівняння (6) приводить його до вигляду (5), якщо покласти

$$\alpha = \alpha^* (\sigma_{\max} - \sigma_s),$$

де σ_s – усереднене значення концентрації осаду.

Рівняння (5) і (6) широко використовуються при моделюванні механічної суфозії і кольматації в гідротехніці і меліорації [8–10].

У загальному випадку процеси фільтрації і міграції зважених забруднень і дрібних частинок ґрунту у зонах впливу глибоких котлованів мають складну просторову структуру, що значно ускладнює їх моделювання на сучасних персональних комп'ютерах (ПК). Тому для розв'язання прикладних інженерних задач найчастіше використовуються одновимірні чи двовимірні (у просторі) математичні моделі.

Планові математичні моделі фільтрації і масопереносу є наближеними і отримані шляхом інтегрування повних рівнянь (1), (2) по вертикалі і усереднення невідомих функцій, а також коефіцієнтів. Вони також можуть бути отримані безпосередньо з застосуванням рівняння нерозривності і балансових співвідношень для фільтраційних витрат. Математична модель планової фільтрації і конвективної дифузії зважених забруднень і дрібних частинок з урахуванням процесів фізичної адсорбції (кольматажу) і десорбції (суфозії) побудована на зазначених вище принципах з урахуванням рівняння кінетики (6).

Така модель описує зміну рівня ґрунтових вод, динаміку концентрацій зважених забруднень та дрібних частинок ґрунту у пористому просторі під час використання експонентної залежності коефіцієнта фільтрації від концентрації солей осаду у твердій фазі [3; 5]:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(\sigma)(h-m) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(\sigma)(h-m) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \varepsilon; \quad (7)$$

$$\left(n_0 - \frac{\sigma}{\rho_{\text{sed}}} \right) \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial C}{\partial y} \right) - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\varepsilon}{h} (C_p - C);$$

$$k(\sigma) = k_0 \exp \left(-\gamma \frac{\sigma}{\sigma_{\text{max}}} \right);$$

$$V_x = -k(\sigma) \frac{\partial h}{\partial x};$$

$$V_y = -k(\sigma) \frac{\partial h}{\partial y},$$

де μ – коефіцієнт недолику насичення (водовіддачі); $h = h(x, y, t)$ – ордината вільної поверхні фільтраційного потоку; x, y – планові координати; ε – інтенсивність інфільтраційного живлення; n_0 – пористість незакольматованого ґрунту; ρ_{sed} – щільність осаду; $D = D_m + \lambda |V|$; D_m – коефіцієнт молекулярної дифузії; C_p – концентрація зважених забруднень в інфільтраційній воді; $k = k(\sigma(x, y, t))$ – коефіцієнт фільтрації, що залежить від концентрації осаду; k_0 – коефіцієнт фільтрації чистого незакольматованого ґрунту; γ – експериментальний параметр; λ – коефіцієнт гідродисперсії; σ_{max} – концентрація граничного насичення пористих вод дрібнодисперсними забрудненнями та дрібними частинками ґрунту; V_x, V_y – компоненти вектора швидкості фільтрації.

Інші позначення взяті такими самими, як і в рівняннях (1)–(3).

Для визначення невідомих функцій за допомогою рівнянь (7) – (8) задаються початкові і граничні умови, що для характерних випадків фільтрації і масопереносу розглянуті в працях [8; 11].

Врахування баражного ефекту пальових полів або несучільних завіс, які закріплюють стінки котлованів, здійснюється методом додаткових фільтраційних опорів у граничних умовах, або зменшення значень коефіцієнта фільтрації ґрунту у відповідних зонах за формулами, що наведені у праці [12].

Розглянемо математичні моделі плоско-вертикальної фільтрації в умовах однорідного і неоднорідно-шаруватих шарів [11], що враховують зміну коефіцієнта фільтрації при ущільненні ґрунту в зонах значної депресії ґрунтових вод.

Розв'язок розглянутих вище нелінійних рівнянь фільтрації, масопереносу і масообміну для практичних задач отримують, застосовуючи наближені чисельні методи. (7)

Дослідження динаміки ґрунтових вод поблизу глибоких котлованів

Для розв'язання записаних вище рівнянь доцільно застосувати метод кінцевих різниць з використанням неявної безітераційної локально-одновимірної схеми (у кожен розрахунковий момент часу значення коефіцієнтів різницевої рівнянь, що залежать від невідомих функцій, обчислюються за їх значеннями у попередній момент часу).

Кожен розрахунковий інтервал за часом розбивається на два півкроки, на яких по черзі розв'язуються одновимірні аналоги рівнянь (7) і (8) з використанням різницевої апроксимації граничних умов. Наприклад, для рівняння (7) у напрямку осі Ox різницева апроксимація має вигляд.

$$\mu \left(\frac{h_{i,j}^{k+0,5} - h_{i,j}^k}{\Delta x_k / 2} \right) = \frac{1}{\Delta x_c} \left(A_{i,j+0,5} \frac{h_{i,j+1}^{k+0,5} - h_{i,j}^{k+0,5}}{\Delta x_{j+1}} - A_{i,j-0,5} \frac{h_{i,j}^{k+0,5} - h_{i,j-1}^{k+0,5}}{\Delta x_j} \right).$$

Аналогічно записуються різницеві рівняння в напрямку осі Oy , причому коефіцієнти рівнянь мають вигляд, що й у праці [11].

Рішення системи рівнянь (7), (8) отримано методом прогону [11]. Після реалізації другого півкроку за часом обчислюються швидкості фільтрації, а потім розв'язуються рівняння конвективної дифузії, причому для апроксимації конвективного доданка використовується розповсюджена в чисельних розв'язаннях задач гідродинаміки схема з різницями проти потоку

$$\left(n_0 \frac{\sigma_{i,j}}{\rho_{sed}} \right) \left(\frac{C_{i,j}^{k+0.5} - C_{i,j}^k}{\Delta t_k / 2} \right) =$$

$$= \frac{1}{\Delta x_c} \left(D_{i,j+0.5} \frac{C_{i,j+1}^{k+0.5} - C_{i,j}^{k+0.5}}{\Delta x_{j+1}} - D_{i,j-0.5} \frac{C_{i,j}^{k+0.5} - C_{i,j-1}^{k+0.5}}{\Delta x_j} \right) -$$

$$- V_{x,i,j} \left\{ \left(\frac{C_{i,j}^{k+0.5} - C_{i,j-1}^{k+0.5}}{\Delta x_j} \right), V_{x,i,j} > 0 \right\}$$

$$- V_{x,i,j} \left\{ \left(\frac{C_{i,j}^{k+0.5} - C_{i,j+1}^{k+0.5}}{\Delta x_{j+1}} \right), V_{x,i,j} \leq 0 \right\}$$

$$- \alpha^* (\sigma_{max} - \sigma_{i,j}^k) C_{i,j}^r + \beta \sigma_{i,j}^k.$$

Реалізація алгоритму чисельного розв'язання задачі здійснена на ПК після розробки обчислювальної програми.

У використованій методиці введено поняття контуру фільтрації, під яким розуміють межі масиву, де рухається фільтраційний потік.

Розв'язання задачі на ПК проводиться після визначення меж, через які вода надходить до схеми, меж відтоку води зі схеми, меж, по яких вирізують розрахунковий поперечник з масиву і приблизно установлюють межу вільної поверхні (крива депресії). На розрахунковій схемі ці межі повинні бути відображені замкнутим ланцюжком відрізків. Це і є контур фільтрації.

Як приклад розглянемо вплив котловану на динаміку ґрунтових вод в районі будівництва дому по вул. Лютеранській у м. Києві (рис. 1).



Рис. 1. Вигляд кріплення стінок котловану на ділянці будівництва будинку по вул. Лютеранській у м. Києві

Абсолютні позначки поверхні землі у межах розрахункового профілю коливаються від 159,0 до 188,70 м у верхній частині схилу. У геологічній будові до розвіданих глибин схил складено четвертинними, неогеновими та палеогеновими відкладами, які на основі аналізу розподілені на сім інженерно-геологічних елементів. Ґрунтовий потік до будівництва котловану мав потужність 3–5 м і був розташований на глинах в межах прісноводних і лесоподібних суглинків.

Кріплення стінок котловану палями, які перегороджують потік ґрунтових вод, створює бар'ажний ефект, підвищує рівень ґрунтових вод і величину градієнтів фільтраційного потоку поблизу стінок котловану.

На рис. 2 показано розв'язання рівняння (1), що виконано на ПК при кріпленні стінок добре проникною огорожею.

Таке кріплення виконують із фільтруючих елементів, які не перегороджують фільтраційний потік. При цьому зменшуються градієнти фільтраційного потоку і не виникає підтоплення території.

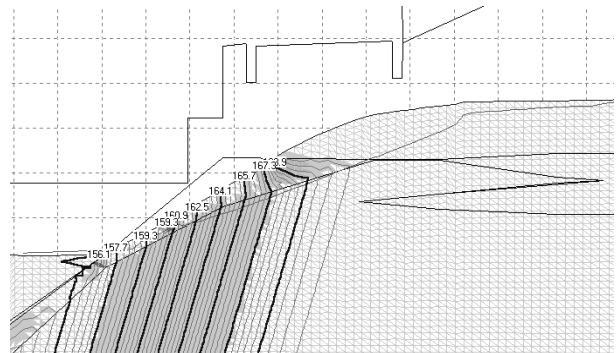


Рис. 2. Дані розв'язання профільної задачі фільтрації при водопроnikних стінках котловану в межах ділянки будівництва будинку по вул. Лютеранській

Конструктивно фільтруючі елементи кріплення котлованів можливо поєднувати з пластовими дренажами, що проектують в основі забудови.

Реально буронабивні палі, які показані на рис. 1, водонепроникні. Для таких умов рівень ґрунтових вод перед котлованом значно підвищується, а в межах конструкції, що огорожує котлован, значно збільшуються градієнти фільтраційного потоку.

Розв'язання фільтраційної задачі для таких умов показано на рис. 3

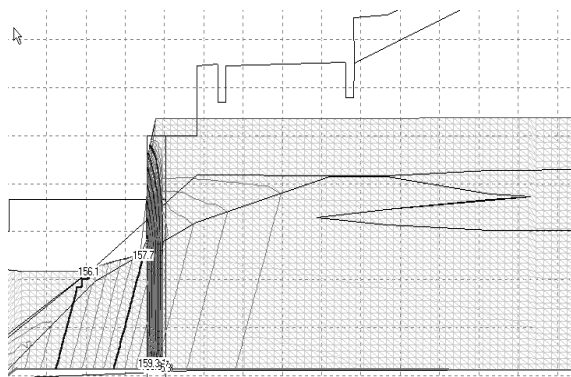


Рис. 3. Дані розв'язання профільної задачі фільтрації для слабопроникних стінок кріплень котловану в межах ділянки будівництва будинку по вул. Лютеранській

На рис. 2 та 3 лініями, що близькі до вертикальних, показані еквіпотенціали фільтраційного потоку, а похилі лінії являють собою межі окремих інженерно-геологічних елементів.

Рівень ґрунтових вод після влаштування кріплення стінок котловану перед котлованом піднявся на 2 – 2,5 м, а зі сторони котловану опустився на 1,5 – 1,8 м.

На ділянці височування фільтраційного потоку в котлован між палями різко збільшились градієнти фільтраційного потоку.

Висновки

Математичне моделювання рівня ґрунтових вод на забудованих територіях при осушенні глибоких котлованів вимагає розв'язання нелінійних рівнянь фільтрації, яке можна одержати наближеними чисельними методами з застосуванням ПК.

Дані розв'язання задачі профільної фільтрації показали значне підвищення рівнів ґрунтових вод перед котлованом при застосуванні мало проникних кріплень. При цьому також значно збільшуються градієнти фільтраційного потоку поблизу котловану, що спричиняє суфозійні виноси ґрунту.

Для одержання надійних прогнозів до початку моделювання слід проводити ретельні натурні і лабораторні експериментальні дослідження для визначення параметрів моделі.

Моделювання задач на ПК дає змогу встановити величину підняття рівня ґрунтових вод за рахунок баражного ефекту та величини градієнтів фільтраційного потоку.

Список літератури

1. Аравин В.И., Носова О.Н. Натурные исследования фильтрации. – Л.: Энергия, 1969. – 255 с.
2. Гавшина З.П., Дзекцер Е.С. Условия подтопления ґрунтовыми водами застраиваемых территорий. – М.: Стройиздат, 1982. – 116 с.
3. Кремез В.С. Моделирование влияния кольматации ґрунта на уровень ґрунтовых вод при фильтрации из водохранилища // Гидравлика и гидротехника. – К.: Техніка, 1999. – Вып. 60. – С. 67–71.
4. Олійник О.Я., Кисельов С.К. Теоретичні дослідження втрат напору на очисних фільтрах при знезалізненні води // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К. – 2003. – Вип. 1. – С. 3–12.
5. Тугай А.М. Визначення динаміки зміни рівнів води свердловин при їх кольматції сполуками заліза // Вісн. Рівнен. держ. техн. ун-ту. – Рівне: РДТУ, 2002. – №1(14). – С. 107–115.
6. Поляков В.Л. Механічна суфозія ґрунтів при роботі дренажу в режимі зволоження // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: 2003. – Вип. 1. – С. 102–107.
7. Хлапук М.М., Бомба А.Я., Сидорчук Б.П. Про моделювання взаємовпливу фільтрації та механічної суфозії // Сучасні проблеми теорії фільтрації: Вісн. – Рівне: УДАВГ, 1998. – С. 157–165.
8. Методы прогноза солевого режима ґрунтов и ґрунтовых вод // Под ред. Н.Н. Веригина. – М.: Колос, 1979. – 336 с.
9. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород / Н.Н. Веригин, С.В. Васильев, В.С. Саркисян, Б.С. Шержуков. – М.: Недра, 1977. – 271 с.
10. Алексеев В.С., Коммунар Г.М., Шержуков Б.С. Массоперенос в водонасыщенных горных породах // Итоги науки и техники. Сер. Гидрогеология. Инженерная геология. – М.: ВИНТИ. – 1989. № 11. – 142 с.
11. Добронравов А.А., Кремез В.С., Сырий В.С. Расчет на ЭВМ нестационарной фильтрации в районах гидротехнических сооружений. – К.: Наук. думка, 1980. – 184 с.
12. Дегтярев Б.М. Дренаж в промышленном и гражданском строительстве. – М.: Стройиздат, 1990. – 238 с.

Стаття надійшла до редакції 03.11.04.

В.А. Соколовская

Моделирование фильтрации ґрунтовых вод на застроенных территориях с учетом воздействия глубоких котлованов

Проанализировано влияние глубоких котлованов на динамику ґрунтовых вод в границах застройки. Приведены основные уравнения для моделирования процессов, происходящих в ґрунтах оснований.

V.A. Sokolovska

Modelling of a filtration of subsoil waters in built up territories in view of influence of deep foundation ditches

Influence of deep foundation ditches on dynamics(changes) of subsoil waters in borders of building is analysed. The basic equations for modelling processes which occur in ґрунтах the bases are given.